

# 国内外海底电缆在线监测技术调研综述

邵森安, 赵远涛, 单潜瑜, 周则威, 黄若彬, 唐祺  
(宁波东方电缆股份有限公司, 宁波 315801)

**摘要:** 高压海底电缆是重要的电力通道,且造价高昂,一旦出现故障,后果较为严重。通过海底电缆在线监测技术对海底电缆故障进行主动预防,显得尤为重要。目前,海底电缆在线监测方法种类繁多,其基本原理、主要功能、定位精度等各不相同。为比较分析不同在线监测方法的优缺点,进一步提高海底电缆在线监测技术水平和电缆故障定位精度,本工作对国内外最新的、主流的海底电缆在线监测技术进行调研,对各种技术的特性和优缺点进行梳理,并提出优化和改进海底电缆在线监测技术的方法。

**关键词:** 海底电缆; 本体在线监测; 路由在线监测

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2023)03-0018-06

## Summary of Investigations on Online Monitoring Technology of Submarine Cables at Home and Abroad

SHAO Sen'an, ZHAO Yuantao, SHAN Qianyu, ZHOU Zewei, HUANG Ruobin, TANG Qi  
(Ningbo Orient Wires & Cables Co., Ltd., Ningbo 315801, China)

**Abstract:** Submarine cables are important power channels and are costly. Once a failure occurs, consequences are often more serious. Therefore, it is very important to take active prevention in the failure of submarine cables through online monitoring technology. At present, there are many kinds of online monitoring methods for submarine cables, and their basic principles, main functions, and positioning accuracy are various. In order to analyze and compare the advantages and disadvantages of different online monitoring methods, and further improve the online monitoring technology level and failure location accuracy of submarine cables, the latest and mainstream submarine cables online monitoring technologies at home and abroad were investigated, and sorted out the characteristics and advantages and disadvantages of various technologies. And methods for optimizing and improving the online monitoring technologies of submarine cables were proposed.

**Key words:** submarine cables; cable body online monitoring; route online monitoring

## 0 引言

海底电缆(以下简称海缆)在线监测主要分为路由在线监测与本体在线监测,前者主要包括水上与水下监测两方面。水上监测通常利用海事部门的船舶自动识别系统(AIS)和船舶交通服务(VTS)等手段,实时监测海缆路由区域的船只与障碍物,防止过往船只在海缆路由区域内抛锚。同时,为弥补上述系统漏报率高、被动接受等缺陷,还可采用岸基雷达系统进行协同监视。近年来,随着大批新技术、新装备的涌现,路由在线监测也衍生出新领域,如基于无人机、自主式水下航行器(AUV)等的路由监测系统,并逐渐得到应用。海缆近岸段监测主要包括红外观测、高清视频监测等,可为上述监控手段提供近

岸段补充。海缆本体在线监测通过与海缆复合或捆绑光纤作为传感器,在线监测并记录海缆应力、应变、工作温度和振动等参量,评估海缆运行状态。

海缆在线监测对保证海缆安全、可靠、稳定运行具有重要作用,是当前海缆的研究重点之一。由于现有的在线监测手段仍不够成熟,需要不断提高相关技术水平,并结合工程实践不断改进,才能获得理想的海缆在线监测效果。

## 1 海缆温度、振动、应力在线监测技术

### 1.1 分布式光纤在线监测技术

分布式光纤在线监测是一种比较成熟的分布式测量技术,通常包括后台主机和测量光纤,光纤在测量系统中既作为传感器,又作为信号传输通道。通过在海缆沿线敷设光纤,实时监测全线海缆的温度、振动、应力的分布情况<sup>[1]</sup>。分布式光纤在线监测技术具有抗电磁干扰<sup>[2]</sup>、耐高压、尺寸小等优点,在实际应用中效果较好,尤其是温度测量具有良好的准

收稿日期: 2023-03-24

作者简介: 邵森安(1996—),男,助理工程师。

E-mail: ssa@orientcable.com

精度<sup>[3]</sup>,这对提高海缆线路的有效传输容量具有重要作用<sup>[4]</sup>。

光纤测量技术起源于20世纪70年代,主要利用拉曼散射、布里渊散射<sup>[5-7]</sup>和瑞利散射<sup>[8-9]</sup>等现象实现传感功能,光纤中光的散射示意图见图1。目前,国外已研究出先进的光纤监测技术,如基于支持向量机(SVM)、单斜坡法、模式识别等手段的海缆温度、振动与应变等信号监测,取得显著进展,并在海缆项目中得到广泛应用<sup>[10-11]</sup>。同时,国内的国网电科院、南网科研院、各大高校等也已成功研制出各种分布式光纤测量系统并投入运行。通过分布式光纤测量系统对海缆运行状态进行在线监测,可以发现海缆运行期间导体温度过高<sup>[12]</sup>、外力破坏引起的振动和应力变化等异常信息<sup>[13]</sup>。监测结果对于监测海缆的健康状态<sup>[14]</sup>、准确预测和实时调整海缆输送容量具有重要指导作用。

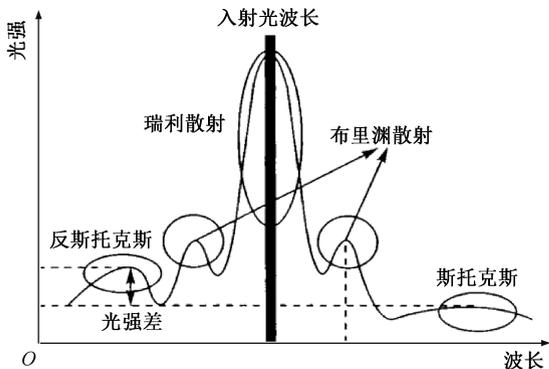


图1 光纤中光的散射示意图

分布式光纤测量系统的应用主要包括两种形式:在海缆敷设线路上同时敷设测量光缆和在海缆制造时复合测量光纤<sup>[15]</sup>。目前,国内110 kV及以上的海缆项目大多加装了分布式光纤测量系统,对于新敷设的超高压海缆线路,通常要求敷设光纤系统<sup>[16]</sup>。国外尤其是欧洲的海缆项目,基本采用在海缆内部集成光纤或光缆的形式。捆绑式敷设所使用的光缆均是单独设计和制造,具有机械强度较高、安装和运行过程中不易损坏等优点,缺点是测量准确度比复合式低。

国内外实践经验表明,分布式光纤测量系统仍存在空间分辨率较低(米级)、测量距离受限(基于拉曼散射的光纤传感器,测量距离约为10 km;基于布里渊散射的光纤传感器,测量距离约为25 km)<sup>[17]</sup>、受光纤敷设方式影响较大等不足,需在后续的研究和工程实践中解决。

## 1.2 光纤光栅测量

光纤光栅属于波长调制型光纤传感器,利用光

纤的光敏性特征,形成空间相位光栅,通过调制布拉格光栅中心波长获取传感数据。光纤光栅具有质量小、体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰、性价比高等优势,可进行连续高分辨率温度测量,适合在恶劣工况下运行。

作为新型温度监测技术,分布式光纤光栅温度传感器具有易安装、精度高、稳定可靠等优势,可实现长距离大范围多点测量。根据传感原理,只有满足布拉格条件的光波才能被光纤布拉格光栅反射,具体见式(1):

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: $\Lambda$ 为光栅周期; $n_{\text{eff}}$ 为光纤有效折射率; $\lambda_B$ 为光栅的布拉格波长。

受外界环境影响时, $\Delta\Lambda$ 和 $\Delta n_{\text{eff}}$ 分别为 $\Lambda$ 和 $n_{\text{eff}}$ 的变化量, $\Delta\lambda_B$ 为符合布拉格条件的反射波长漂移量。因此通过监测返回光中特殊波长的位移情况,可以解析光纤沿线的分布式参数。根据光纤温度、应力变化对波长的影响规律,可以实时监测光纤沿线的温度、应力状态。通过测量布拉格波长的位移,可以得到光纤沿线的温度和应力分布情况。

国外的光纤光栅测量技术发展较早,相比国内的研究更加成熟。目前,国内的部分海陆缆项目采用了国外设计生产的光纤光栅测量系统,运用效果良好,但系统造价与使用成本较高;同时,国内的一些厂家也在与高校、科研院所等机构合作进行相关领域的研究,并取得了一些进展。但总体上,国内的研究成果仍不太成熟,还有很大的提升空间<sup>[18]</sup>。

## 1.3 红外热成像测量技术

红外热成像技术是电力设备温度检测的重要手段,原理是通过检测设备的红外辐射能量,将能量分布图形反映在红外探测器的光敏元件上,以推断设备的温度,进而判断设备是否存在缺陷。电缆设备在运行时易产生电流致热和电压致热,电流致热的主要发热点为电缆终端出线与其他设备的连接点;电压致热主要表现为局部放电和介质损耗导致的发热,典型部位为电缆终端应力锥。

红外热成像测量技术是一种比较成熟的监测方法,与其他测量方式相比,其最大的优点是可以对设备进行非接触式测量。电缆设备的红外诊断已积累大量经验,目前,行业内已发布红外测量和红外诊断的标准DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》。针对电缆终端漏油、异常发热等缺陷的红外测量,国内外的研究人员均进行了分析研究,并取得显著进展<sup>[19-20]</sup>。另外,各电力运行单位也逐步建立了设备的红外测量档案库,在历史数据的基础上,红

外测量将发挥更大的诊断价值。

红外热成像测量技术的不足主要为测量时易受外部环境因素的干扰,不能全天候测量,同时也不适用于直埋海缆本体和电缆附件内部缺陷的检测<sup>[21]</sup>。

## 2 局部放电在线监测

海缆局部放电量与海缆绝缘状态密切相关,其变化表明绝缘可能存在危及海缆安全可靠运行的缺陷。通过检测交联聚乙烯(XLPE)绝缘海缆的局部放电信号,可有效评估海缆绝缘老化情况。目前,监测局部放电的途径较多,主要包括电容耦合法和电感耦合法<sup>[22]</sup>。

### 2.1 电容耦合法

电容耦合传感器是在局部放电信号引起的电场中耦合能量,获得电压信号,可安放在海缆金属屏蔽层内,具有受外界电磁干扰小、稳定性高、可靠性高、结构简单等特点,同时也可以每在每组接头处安装电容耦合传感器,这种准分布式结构可对局部放电进行定位,但缺点是制造过程较为严格与繁琐,须确保保护套的抗变形能力与防水性能。该技术应用于海缆时,电缆长度过长会导致传感器检测信号衰减严重,测量精度大幅下降,通常电容耦合法仅应用于登陆段时具有良好效果。

### 2.2 电感耦合法

电感耦合法的原理是将线圈绕在流过放电信号的导体上产生感应电势,反映局部放电信息。罗高夫斯基线圈是一种最典型的电感耦合传感器,其工作频率范围可达10~30 MHz,能较好地满足现场局部放电测量要求。电感耦合传感器最常用的安装方法是直接卡在电缆接地线上,其结构简单,安装更换方便,但容易受现场信号干扰影响。由于海缆两端通常直接接地,这种方法往往只能测量终端附近一定范围内的局部放电,无法监测整个路由的局部放电。

局部放电信号弱、波形复杂、受外部影响大等问题,是实现局部放电在线监测的主要障碍<sup>[23]</sup>,难点是抑制干扰、信号识别和数据处理,解决方法是将完善的硬件技术和先进的数学方法相结合。目前,国内外专家们试图通过软硬件方法抑制干扰,主要方法有差动平衡法、脉冲极性鉴别法、模拟带通滤波器、数字滤波技术和小波分析等<sup>[24]</sup>。

## 3 护套电压在线监测

当海缆为单芯结构且电压级别较高时,金属护套会产生较高的感应电压。为限制感应电压,对于

长度较短的海缆,可在两端将金属护层直接接地;当海缆长度较长时,往往将金属护层外的聚乙烯护套改为半导体护套,防止护套承受高压甚至击穿。但目前仍有一些海缆未采用半导体护套,若护套击穿或破损,将导致海水沿缺口浸入金属护层表面,对其造成腐蚀,因此在线监测护套所承受的电压至关重要。护套电压在线监测方法通过在海缆两端接地线上安装工频电流互感器<sup>[25]</sup>,监测接地环流固定值和反馈变化值以监测护套电压,现国内多家科研院所及相关单位均对该方法进行了研究和实践。接地电流监测是评估海缆护套状态的重要方式,也是未来海缆在线监测技术体系中的重要一环。

## 4 介质损耗角( $\tan \delta$ )在线监测

研究表明, $\tan \delta$ 随着绝缘老化程度的增大而增加<sup>[26]</sup>,实时测量 $\tan \delta$ ,可判定海缆绝缘状况。

$\tan \delta$ 在线监测法的原理是检测两个正弦波过零点的时间差,根据时间差和频率获取相位差<sup>[27]</sup>。该方法对过零点检测设备的稳定性和检测精度要求很高,同时对检测信号要求也较高。但 $\tan \delta$ 仅能反映绝缘整体性能的好坏,不能反映因老化、受潮等因素引起的绝缘劣化,因此该方法并未得到大范围推广。

## 5 海缆路由在线监测主要技术

### 5.1 基于AIS的海缆综合监控系统

该系统以AIS为基础,利用电子海图对海缆路由沿线划定警戒区域,通过软件开发实现对进入警戒区域后停留或是疑似停留的船舶自动报警提示(报警信息同时记录在数据库中,可供查询);同时记录进入禁锚区的船舶的实时航行轨迹,并自动生成该区域可疑船舶列表。基于AIS的海缆综合监控系统的相关信息是通过无线传输模块以点对点的方式传输至各光纤熔接点,再通过电力通信光纤将数据传回电力局海缆监控中心。此外系统还能自动调用视频监控对该区域进行实时现场图像监视。

基于AIS的海缆综合监控系统集成计算机、无线通信、全球卫星定位、电子海图等技术,实现了对海缆的全天候监控。通过集成各类信息,实现对海缆路由区域船舶异常状况的主动报警,并将国际电子海图标准IHO S-57应用到海缆领域,实时更新电子海图数据。

系统自动接收海缆保护区的过往船舶信息,当发现有船舶处于海缆保护区内,并无法满足系统规定的时间和速度时,将立即启动报警程序。系统将

自动定位到异常区域,重点监控异常船舶,并及时将情况反馈给有关部门,避免事故发生。在海缆警戒区域的海图上,设置流量统计线,统计过往船舶数量,重点监控流量较大的区域。

现 AIS 已在国内的主要交直流海缆项目中得到广泛运用,包括南澳±160 kV 直流海缆工程、舟山±200 kV 柔直输电工程、如东交直流海缆工程等<sup>[28]</sup>。

### 5.2 VTS 系统及岸基雷达监测系统

雷达是通过发射电磁波,利用目标对电磁波的反射来发现目标并测定其所在位置和运动状态的设备。岸基雷达监测系统具有受天气影响小、覆盖范围广等优势,配合卫星监控、潜标监控、近岸监控等手段,可实现对海缆保护区的全时监控<sup>[29]</sup>。由于 AIS 系统不能覆盖所有船只,因此雷达系统可以弥补覆盖范围的不足,并且在恶劣天气下可以发现卫星难以发现的目标。

雷达系统主要由天线、发射机、接收机、信号处理机和终端设备等组成。利用岸基雷达监测系统,可以对海缆路由区域内活动的船只进行更精准的监测。海缆运营部门利用雷达数据,可以更好地防止船只在海缆路由区域内违规抛锚,同时对可能威胁海缆的船只事件进行预防,大大提高海缆保护水平<sup>[30]</sup>。

此外,岸基雷达最重要的应用是 VTS 系统,该系统可提高船舶交通安全水平和交通管理效率以保护海缆设施<sup>[31]</sup>。VTS 系统以岸基雷达为主要探测设备,以数据处理设备为核心,通过通讯手段实时收发船舶交通信息。目前,VTS 系统已广泛应用于琼州海峡 500 kV 海缆工程等项目,极大提高了海缆运行状态的监控水平。如何让 VTS 系统在海缆在线监测体系中发挥更大的作用与优势,提高 VTS 系统在海缆监测体系中的兼容性,仍需进一步深入研究<sup>[32]</sup>。

### 5.3 基于潜标技术的洋流、波浪、潮汐监测

潜标是系泊在海面以下对海洋环境、海上活动等进行近距离监测的海上工作平台。潜标以主浮体为依托平台,采用外置或内嵌的方式安装传感单元,通过通信电缆或海面通信浮标传输数据,实现海洋离岸在线监测。海缆路由监测潜标系统主要用于洋流流速测量、海水温度测量、视频测量等。

洋流速度的测量可以有效监测海洋环境对海缆稳定性、加盖保护物稳定性的影响,实时监测海缆的完整性。海水温度的测量可以有效监测海水对海缆载流量的影响,也可以作为事故状态下故障定位的

辅助手段。水下视频监控可直观地监测海缆路由受外力破坏情况,随着相关技术的快速发展,现可实现深水区耐水压摄像、弱光区红外摄像、高清摄像等功能,对于非法捕捞、违规抛锚等行为具有重要防范作用。

目前,国内外对于潜标的研究主要集中于潜标在海洋中的静、动态力学分析<sup>[33]</sup>,对于潜标在实际应用时的性能表现等方面的研究成果较少。

### 5.4 基于声呐监测技术的探测与定位

由于电磁波和光波入水几十米、甚至十几米就迅速衰减,导致无法远距离传播,而声波是海水中唯一能进行远距离传播的能量载体;另一方面,由于水下能见度极低,而水下目标光视觉信息的获取需要较好的光照条件才能实现,因此声呐探测在海缆监测中得到了广泛应用<sup>[34]</sup>。

声呐是利用声波在水中的传播和反射特性,对水下目标进行探测、定位和通信的电子设备。由于不同物体反射声信号的强度和频谱信息是不一样的,声呐的接收设备将接收到的信息经过处理后,与数据库里面的数据进行比对,就能判断出所遇物体的性质和特征,甚至能判别其运动速度和方向,不同类型船只的回音类型及回波特性见表 1。

表 1 不同类型船只的回音及回波特性

船只类型	回音类型	回波特征
水面船只	清脆而带有尾声	清晰,成直线
木船	低沉、粗糙、响度较弱	较为清晰,波形较粘滞
水下机器人	清脆、短促	较细而集中

声呐分为主动声呐(回声定位仪)和被动声呐(噪声测向仪),其中被动声呐多用于常规海缆监测。对于基于声呐的海缆在线监测系统,其供电系统需要铺设专用的中低压海缆,通信系统是通过专用的海底光纤将采集到的信号传输至监控中心<sup>[35]</sup>。因此,在实际使用时,应结合通航、捕捞情况,合理布置声呐点位,以达到技术性经济性合理优化的目标。

目前,国内外已有多款声呐设备投入海缆监测的应用场景中,以集成于 AUV 和遥控潜器(ROV)等载体或海洋“拖鱼”等形式使用。其中欧美厂家研制的声呐设备具有工作深度深(2 000 m 以上)、分辨率高(厘米级别)、抗干扰能力强等优势<sup>[36]</sup>,但造价和使用成本较高。近年来,国内的声呐技术发展迅速,部分性能与国外同类产品相当,且成本更低,但产品的可靠性等指标仍存在差距,需进一步研究解决。

### 5.5 潜航器

潜航器体积小、结构紧凑、密封性好,适合深水作业<sup>[37]</sup>,根据海缆埋深和海底状况,水深至少可达100 m,可抵抗相应水压;工作海域水流流速大,潜航器可在不大于2节的流速下工作;潜航器的水中浮力可调,分为正、负、零浮力,以满足不同工况时的需求;潜航器既可由线缆拖拽式供电,也可由自带高能电池蓄电工作,在紧急情况下还具备自控飘浮并报警等功能。潜航器自配姿态传感控制仪器,埋深测量仪,温度、压力、深度传感器等<sup>[38]</sup>,能实现对海缆路由的视频监测、坐标和埋深检测、环境参数测量等多种功能。近年来,不少发达国家陆续进行了利用潜航器自动跟踪监测海缆运行状态的工作;同时国产潜航器已经同全球定位系统(GPS)和北斗定位系统相兼容,具有相当高的水下定位精度,可满足应用要求。

### 5.6 基于无人机的海面全时自动巡航巡检

近年来,国产无人机技术有了长足发展,在海缆巡视或应急处置等场景下采用无人机操作,可带来诸多优势。相比巡视船的航速,无人机飞行速度更快,尤其是固定翼无人机,可在极短时间内率先到达事发现场。无人机在第一时间搜寻到涉事船舶后,可以盘旋在船舶上方,通过多种方式向其告知此处海缆的位置及重要性,避免锚害风险。无人机还可同时进行现场核实查证、拍摄取证等工作,提升应急处置能力。无人机体积较小、质量较轻,飞行能耗与运维成本较低,可大大减少巡视船频繁出海的巨大成本,也可降低维护人员海上作业的频率。无人机的广泛应用标志着海缆应急事件处置进入海空一体化、智能化、人性化的新高度<sup>[39]</sup>。

### 5.7 基于视频与红外的海缆近岸段实时监控

视频监控具有信息直观、丰富等优点,作为海缆监测体系的重要组成部分,得到了广泛应用。针对用于安全监控的视频录像,不仅要求其能监视到事件的整个宏观过程,还要能够监控到事件发生的每个细节,使监控视频能够作为取证材料更好地为事件分析提供依据。

高清视频监控的技术核心是高速采集摄像机、高速传输网络,及海量存储需求。部分领域应用的高清监控还应配置自动识别功能,以提高无人值守时的监控效率。

高清视频监视系统只能实现白天清晰监控,为弥补此不足,可采用红外夜视系统实现夜间对海缆保护区近岸海域现场船只通航情况的实时监控。利用红外热成像技术的原理,成像装置可模拟物体表

面温度的空间分布并予以实时显示,红外夜视监控影像见图2。



图2 红外夜视监控影像

目前,工业级红外夜视系统监测的有效距离可达十几千米,能准确辨认5 km以外的常规物体,具有超灵敏、超长距离等特性。

### 5.8 海缆路由立体全时监控

海缆路由立体全时监控系统是以雷达、卫星、潜标等为主体,结合近岸监控、水下监控等手段,实现全时立体监控功能,其主要结构见图3。

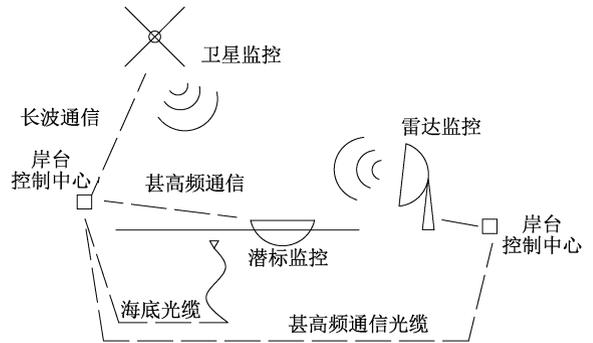


图3 海缆路由立体全时监控

雷达监控系统负责中短距离海面监控,误报率低;卫星监控系统负责大范围海面监控,与雷达监控系统相结合可扩大监控范围,提高监控精度;潜标监控系统负责近距离监控,获取目标细节信息。上述监控系统均具备24小时连续工作、实时传输等功能,因此可实现全时监控功能。近年来,立体全时监控系统还增加了其他辅助监控手段,如水下声呐、近岸视频红外热成像监控、故障定位等。

通过整合上述监控系统,建立以岸台控制为中心的立体监控网络,可实现对海缆路由的立体全时监控,大大提高海缆运行的安全性与可靠性。

## 6 结论

本文阐述了目前国内外主要的、最新的海缆在线监测技术,梳理并说明各种技术的特性和优缺点,有针对性地提出优化和改进海缆在线监测技术的对策与建议。得出的主要结论如下:

1)海缆本体在线监测方面。国内外在分布式光纤监测领域已获得大量研究成果,并取得显著进

展,但对于其他领域,包括局部放电与护套电压在线监测等,现有的监测方法尚不成熟,仍存在较大的发展与提升空间。

2)海缆路由在线监测方面。单一的监测方式往往会存在各种局限性与不足,因此涵盖各监测手段的海缆立体全时监控是今后的发展趋势。随着技术的不断进步,海缆立体全时监控的功能将更加丰富齐全,测量精度更高。

#### 参考文献:

[1] 邵森安,马颢,丰如男,等.海底电缆国内外研究综述[J].南方电网技术,2020,14(11):81-88.

[2] 高鑫.XLPE绝缘海底电缆的应用及试验监测技术研究[J].中国新技术新产品,2018,26(18):73-74.

[3] 严有祥,黄杰,林智雄,等.充油海底电缆温度在线监测系统的原理与实现[J].现代计算机(专业版),2018,35(23):42-46.

[4] CHERUKUPALLI S, MACPHAIL G A, NELSON R E, et al. Application of distributed fibre optic temperature sensing on BC Hydro's 525 kV submarine cable system[C]//CIGRE Session 41<sup>st</sup>. Paris: CIGRE, 2006: B1-203.

[5] 徐志钮,胡宇航,赵丽娟,等.基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法[J].电力自动化设备,2020,40(5):202-209.

[6] 高秋峰,郭家兴.基于VMD-BSA-SVM的海缆振动信号识别方法[J].激光与光电子学进展,2022,59(17):65-74.

[7] CHENG Y. Monitoring method based on GIS for submarine cable fault data[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(3):490(1-16).

[8] 张物生,郭旭敏,刘龙春,等.高压直流海缆综合在线监测系统研究[J].电测与仪表,2016,53(22):27-33.

[9] 张旭苹,陈晓红,梁蕾,等.长距离海缆在线监测改进型C-OTDR系统[J].光学学报,2021,41(13):9-20.

[10] 张颖,张娟,郭玉静,等.分布式光纤温度传感器的研究现状及趋势[J].仪表技术与传感器,2007,44(8):1-3.

[11] HUANG X, YAO K, SUN G, et al. Onshore simulation test setup for temperature and strain sensing of submarine cable based on BOTDA [C]//2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment ( ICEMPE ). Guangzhou: IEEE, 2019: 400-403.

[12] ZHOU J, YAO K, HUANG X, et al. Temperature calculation and measurement on power cable conductor based on equivalent thermal circuit and BOTDA [C]//2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe ( IEEEIC/ I&CPS Europe ). Genova: IEEE, 2019: 1-4.

[13] FOU DA B M T, YANG B, HAN D, et al. Pattern recognition of optical fiber vibration signal of the submarine cable for its safety [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(5): 6510-6519.

[14] MASOUDI A, PILGRIM J A, NEWSON T P, et al. Subsea cable condition monitoring with distributed optical fiber vibration

sensor [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1352-1358.

[15] HUANG X, LI Y, WU C, et al. Temperature online monitoring of submarine cable based on BOTDA and FOCT [C]//2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference ( CIEEC ). Beijing, IEEE, 2019: 1229-1233.

[16] CHEN Y, WANG S, HAO Y, et al. The 500 kV oil-filled submarine cable temperature monitoring system based on BOTDA distributed optical fiber sensing technology [C]//2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence ( ICSMD ). Xi'an: IEEE, 2020: 180-183.

[17] 高红武,安博文.复合海缆在线监测研究[J].船海工程,2014,43(5):87-89.

[18] 李军.光纤光栅测温系统在电力电缆温度在线监测中的应用[J].华东电力,2005,34(12):61-63.

[19] 马超,李宁,李新平,等.基于红外热成像的电缆终端漏油缺陷检测机理分析[J].南方电网技术,2021,15(5):58-63.

[20] 罗汪彬,谢维,徐宏斌,等.一起基于红外图像的高压电缆终端异常发热缺陷分析[J].农村电气化,2021,43(12):33-36.

[21] 覃华,徐志钮,袁柏秋,等.分布式光纤传感技术在涠洲岛跨海联网工程中的应用研究[J].科技和产业,2020,20(5):161-167.

[22] 肖世杰,胡列翔,周自强,等.交联聚乙烯绝缘海底电缆应用及试验监测技术评述[J].绝缘材料,2018,51(1):1-9.

[23] WANG W, YAN X, LI S, et al. Failure of submarine cables used in high-voltage power transmission: Characteristics, mechanisms, key issues and prospects [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2021, 15(9): 1387-1402.

[24] 蔡敏,刘晓安.XLPE电力电缆局放检测技术的发展和现状[J].西北电力技术,2003,31(4):31-32.

[25] 陈创庭,张国胜,周志成,等.环流法监测XLPE电缆金属护套多点接地[J].高电压技术,2002,28(7):28-29.

[26] 徐志钮,胡志伟,赵丽娟,等.光电复合海缆温度场建模分析及在在线监测中的应用[J].红外与激光工程,2018,47(7):161-169.

[27] 柴旭峰,关根志,黄海鲲,等.交联聚乙烯电力电缆的绝缘在线监测技术[J].电线电缆,2002,45(6):30-33.

[28] 侯帅,王毅松,朱闻博,等.高压海底电缆监测技术与应用综述[J].南方电网技术,2022,16(12):1-10.

[29] 杜兰.雷达高分辨距离像目标识别方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2007.

[30] 于大为.110 kV海缆实时在线监测预警系统[J].科技创新与应用,2018,8(4):44-45.

[31] 戚群,于涛.船舶交通管理系统(VTS)发展概况[J].中国无线电,2013,27(4):36-38.

[32] 芦海.VTS系统在海底电缆保护中的应用研究[J].机电信息,2015,15(6):3-4.

[33] 米智楠,程堃,杨群慧,等.基于动态布放的潜标锚系浮力配置优化研究[J].海洋技术学报,2020,39(2):39-46.

[34] URICK R J.水声原理[M].哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院出版社,1990.

- [32] 郑刚. 一种新型具有增强功效的加热电缆: CN212486825U [P]. 2021-02-05.
- [33] 饶军, 王永新, 丁前丰, 等. 一种加热电缆与钢束复合型拉索桥防挂冰装置: CN212452296U [P]. 2021-02-02.
- [34] 孟向明, 孙召龙, 于大华, 等. 一种空心抽油杆加热电缆密封和定位装置: CN212389312U [P]. 2021-01-22.
- [35] 顾贤. 一种新型加热电缆: CN212367559U [P]. 2021-01-15.
- [36] 杨志, 曾润. 一种新型潜油加热电缆: CN211509322U [P]. 2020-09-15.
- [37] 顾贤. 一种基于集肤效应的加热电缆: CN212344089U [P]. 2021-01-12.
- [38] 仇家斌, 曹殿琦, 崔明晨, 等. 一种大功率超高温恒温加热电缆及其应用: CN111885758A [P]. 2020-11-03.
- [39] 董健, 郑镔, 孙启发, 等. 一种三相加热电缆: CN212231748U [P]. 2020-12-25.
- [40] 徐红骏. 集肤高温加热装置: CN213712279U [P]. 2021-07-16.
- [41] 薛道荣, 王伟, 庞爱红. 新型太阳能采暖系统: CN215373013U [P]. 2021-12-31.
- [42] 郝永生. 一种用于电热地膜采暖装置的安装结构: CN214841115U [P]. 2021-11-23.
- [43] 杜礼明, 侯宝信. 基于发热线缆的轨道客车地板辐射采暖系统: CN214775882U [P]. 2021-11-19.
- [44] 章其雨. 一种低温状态下含伴热带的太阳能热水系统: CN214223438U [P]. 2021-09-17.
- [45] 李可可, 陈大华, 潘立升, 等. 一种应用于整车低温环境的线缆保护装置: CN215300062U [P]. 2021-12-24.
- [46] 孙红军. 一种具有实时测温的智能伴热电缆: CN214592044U [P]. 2021-11-02.
- [47] 岳洪亮, 赵辉, 英正飞. 一种伴热电缆的温度监控系统: CN214311472U [P]. 2021-09-28.
- [48] 王涛. 一种电伴热带监测仪: CN212808577U [P]. 2021-03-26.
- [49] 黄鹏, 徐玲, 李越冰, 等. 一种电厂用伴热带智能控制系统: CN212752664U [P]. 2021-03-19.
- [50] 吴美君. 一种基于物联网的智能电地暖系统的远程控制方法: CN111664501B [P]. 2021-08-13.
- [51] 于龙文, 陈胜利, 居文平, 等. 一种应用于空冷岛的智能防冻系统: CN212409426U [P]. 2021-01-26.
- [52] 付俊杰, 王大伟. 一种汽水测点伴热巡检智能系统: CN209623897U [P]. 2019-11-12.
- [53] 梁正才. 电伴热技术在寒冷地区隧道水消防管道保温中的应用 [J]. 电器工业, 2022(3): 67-69.
- [54] 王海波, 李振宇, 赵保林. 大型低温储罐落地式基础电伴热的设置及计算 [J]. 化肥设计, 2022, 60(1): 42-44.
- [55] 杜小刚. 恒功率电伴热系统在地铁工程中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2020(2): 45-46.
- [56] 李胜利, 谢雷, 陈维, 等. 电伴热工程设计与安装应用研究 [J]. 中国设备工程, 2022(17): 197-199.
- [57] 栾旭, 张德成, 崔明凯. 电伴热技术的实际应用和展望 [J]. 当代化工, 2021, 50(5): 1226-1230.
- [58] 朱昌新. 管道(容器)电伴热保温的应用探讨 [J]. 硫磷设计与粉体工程, 2020(6): 38-42.
- [59] 高伟超, 葛磊. 并联式电伴热技术在隧道消防系统中的应用 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(9): 78-80.
- [60] 李鹏程, 周晓红, 汪大林, 等. 高凝原油输送管道流动安全保障设计探讨 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(2): 52-55.
- [61] 万光芬, 欧阳俊, 刘国锋, 等. 海底管道伴热技术应用 [J]. 中国海洋平台, 2021, 36(4): 57-62.
- [62] 刘忠军. 爆炸危险区域电伴热现场智能控制器的设计及应用 [J]. 防爆电机, 2017, 52(4): 38-42.
- [63] 侯英, 杨晶婧. 浅谈电伴热在水泥生产线余热发电中的应用 [J]. 水泥技术, 2018(1): 92-95.
- [64] 丁跃. 石油化工装置中工艺管道的伴热设计分析 [J]. 化工管理, 2016(2): 141-141.
- [65] 何吉飞. 半潜式钻井平台电伴热系统的设计与应用 [J]. 船舶标准化工程师, 2018, 51(5): 27-29.
- [66] 林宝佛. 住宅热水支管自控温电伴热系统探讨 [J]. 福建建设科技, 2016(4): 65-67.
- [67] 马军卫. 低温环境供水管道防冻解决方案 [J]. 设备管理与维修, 2021(5): 142-144.
- [68] 权娜娜, 张玮, 江志宏. 关于锅炉脱硫系统防寒防冻改造的研究 [J]. 甘肃科技纵横, 2020, 49(3): 24-26.
- [69] 张宗喜, 张营华, 李昊. 中国北方地区清洁取暖分析及建议 [J]. 能源与环境, 2020(2): 9-11.

(上接第 23 页)

- [35] 谢志敏. 岸基声呐海底光纤缆阵在线监测技术 [J]. 声学电子工程, 2022, 37(3): 8-11.
- [36] 冀大雄, 周佳龙, 钱建华, 等. 海底电缆检测方法发展现状综述 [J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 36-49.
- [37] CAO C, GE Y, REN X, et al. Experimental research on submarine cable monitoring method based on MEMS sensor [J]. Micro and Nano Engineering, 2022(15): 100130.
- [38] LIU B, WANG G, CHEN B, et al. Research on detection operation of submarine cable inspection robot based on side scan sonar [C] // 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA). Tianjin: IEEE, 2020: 127-131.
- [39] 陈西广, 董罡, 王滨海, 等. 固定翼无人机巡检输电线路探讨 [J]. 山东电力技术, 2011, 38(5): 1-5.